АЛМАЗНОЕ МИКРОТОЧЕНИЕ. КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

М.Ф. Данилов, С.В. Солк, А.А. Яковлев.
188540, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., ФГУП НИИКИ ОЭП,
т. (81369) 21188 e-mail: solk@sbor.net

Рассмотрены варианты расширения технических возможностей станков алмазного микроточения путём координатных преобразований и аппроксимации уравнений асферических оптических поверхностей. Приведена методика расчёта, определены факторы, влияющие на погрешность аппроксимации и изготовления поверхностей, рассмотрено применение метода для станков токарного типа.

Конструктивные особенности и технические характеристики станков алмазного микроточения (АМТ) накладывают жёсткие ограничения на параметры оптических поверхностей, которые могут быть изготовлены на этих станках. В первую очередь это касается асферичности и угловой апертуры оптических поверхностей. Тем не менее, у технологов всегда есть желание эти ограничения обойти. В первую очередь это касается оптических элементов, работающих в ИК диапазоне спектра с нежёсткими требованиями к точности формы рабочих поверхностей.

В литературе, например [1, 2], рассмотрены варианты расширения технических возможностей станков путём координатных преобразований уравнений асферических поверхностей при некоторой потере точности изготовления этих поверхностей. Нами проанализированы предложенные решения и возможность их использования применительно к станкам АМТ токарного типа МО-200 и МО - 500 (схема Δx, Δφ) [3]. Выбор типа станков обусловлен их наличием на предприятиях России и СНГ.

Оптическая поверхность вращения определяется соотношением [4], в котором ось z принята за ось вращения:

$$z = \frac{cS^2}{1+[1-(K+1)c^2S^2]^{1/2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10}, \qquad (1)$$

где $S^2 = x^2 + y^2$, $c = 1/R$ (R – радиус кривизны), A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты асферической деформации; $K = -e^2$ – функция эксцентриситета e коникоида, или коническая постоянная.

Рассмотрим последовательные координатные преобразования сдвига начала системы координат вдоль осей x и z из точки (0, 0) в точку (x_0, z_0)

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 + x_0 \\ y_1 &= y_2 \\ z_1 &= z_2 + z_0 \end{aligned} \qquad (2)$$

и поворота вокруг оси y на угол α

$$\begin{aligned} x_2 &= x_3\cos(\alpha) - z_3\sin(\alpha) \\ y_2 &= y_3 \\ z_2 &= x_3\sin(\alpha) + z_3\cos(\alpha) \end{aligned} \qquad (3)$$

В работе [1] в результате координатных преобразований (2), (3) внеосевой сегмент оптической поверхности (1) при A_1, A_2, A_3, $A_4 = 0$ переводится на ось вращения шпинделя

станка и аппроксимируется осесимметричным сегментом. При этом ищется такое уравнение образующей, чтобы методом наименьших квадратов минимизировать возникающие отклонения новой поверхности от исходной.

Для сравнительной оценки реальных возможностей адаптации рассматриваемого метода к нашим условиям был выполнен расчет данных по алмазному точению для станка МО-200. После предварительного масштабного преобразования исходных данных (уменьшения всех размеров в 20 раз) были получены следующие результаты:

- Поверхность вогнутая;
- $z_н = 0.05625$; $y_н = 15.000$;
- $z_к = 1.80625$; $y_к = 85.000$;
- Rсф = 2000.93103; $\alpha = 3.27878$;
- Fi = 43.61033; Асф = 0.0002.

Так как угол Fi < 56°(максмально допустимое значение для станка МО-200), можно сделать вывод, что представленный пример не является для нас показательным. Детали с подобной геометрией на станке МО-200 можно изготовить без дополнительных координатных преобразований оптической поверхности.

Анализ предложенного подхода показывает, что ошибки изготовления оптической поверхности вращения или ее отдельного сегмента, обусловленные методами координатных преобразований, имеют две составляющие: 1) ошибки замены уравнения образующей (погрешности аппроксимации); 2) ошибки формирования поверхности из-за изменения геометрического положения образующей относительно оси вращения. Вторая составляющая накладывает жесткие ограничения на величину угла поворота α координатной системы. Угол поворота должен быть минимальным, но при этом обеспечивать снижение угла Fi до 50°.

С этой целью был рассмотрен ряд практических примеров изготовления асферических поверхностей, для которых 55° < Fi < 65°, Асф < 200 мкм. Для последующих расчетов было выбрано зеркало с уравнением образующей

$$z^2 = 1440*y + 1.5*y^2 \qquad (4)$$

с Fi ≈ 57°, Асф ≈ 40 мкм. Уравнение новой кривой искалось в следующем общем виде

$$z = a_0 + \sqrt{2Ry + b_2 y^2 + b_3 y^3} \qquad (5)$$

Для оценки ошибок формирования поверхности диаметр внеосевого сегмента был выбран равным ≈ 60 мм, начальное значение $y_н = 72.5$,конечное $y_к = 132.5$. Угол поворота системы координат $\alpha_i = -0.01$ рад ≈ -0.6°.

Таблица 2.

Параметр	a_0	R	b_2	b_3
1	8.10816	706.99848	3.0195	-0.04592
2	0	706.99835	3.01963	-0.04503

Результаты аппроксимации кривой, полученной в результате преобразования поворота, представлены в строке 1 табл. 2, ошибка аппроксимации при этих параметрах составляет величину ≈ 1.5 мкм. Результаты расчета данных для станка МО-200 с параметрами из второй строки табл. 2, полученными после преобразования сдвига по оси Y на величину ΔY = 8.10816, для $y_н$= 34.5, $y_к$= 109.1:

- Поверхность вогнутая;
- $z_н = 2.92472$; $z_н = 10.75463$;
- Rсф = 730.88068; $\alpha = 11.04082$;

- Fi = 53.02526; Асф = 0.0325.

Таким образом, удалось добиться уменьшения угла Fi на 4°, сохранив асферизацию в пределах технологических возможностей станка.

Чтобы оценить ошибки, вызванные изменением геометрического положения образующей относительно оси вращения, была разработана процедура сравнения сегментов двух поверхностей вращения при условии максимально точного совмещения их образующих в пространстве:

1. рассчитываются два массива координат, описывающих соответствующие сегменты поверхностей;
2. через соответствующие координатные преобразования сдвига и поворота одного из массивов происходит совмещение поверхностей в пространстве;
3. оцениваются ошибки формирования сегмента поверхности.

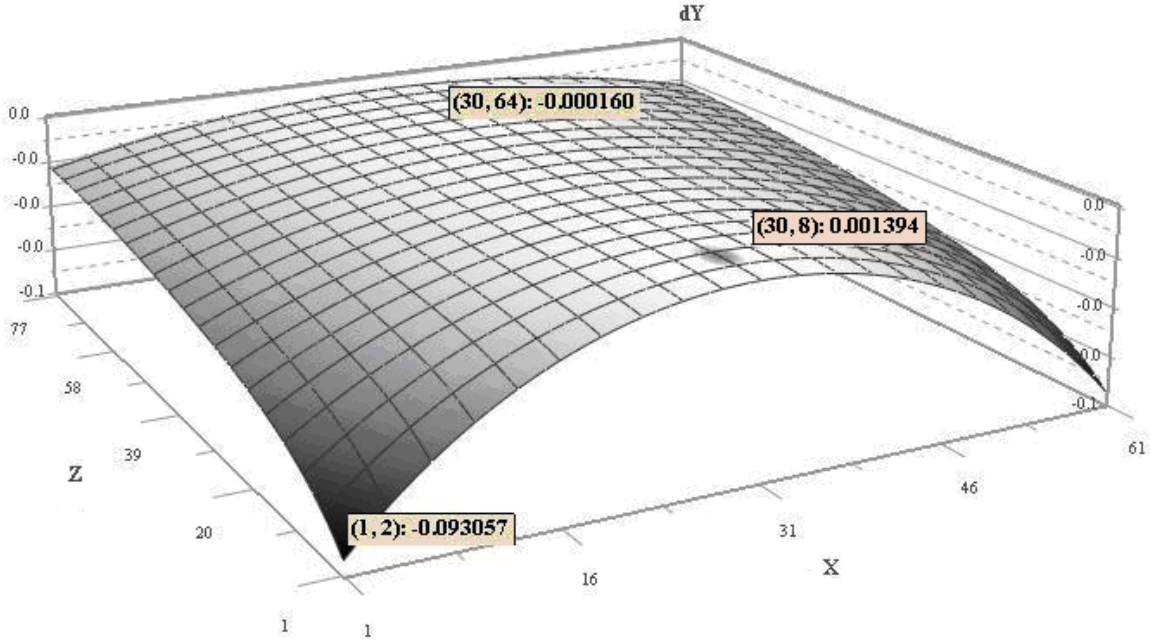

Рис. 1. Результирующие ошибки формирования поверхности вращения.

Результат расчета ошибок представлен на рис.1. Корректность операций преобразования координат и совмещения поверхностей в пространстве может быть оценена по величине ошибок на осевой линии сегмента поверхности. Как видно на рисунке, эти ошибки не превышают 1.5 мкм, что соответствует точности аппроксимации образующей. На границе сегмента с минимальным радиусом вращения $R_1' \approx 68.4$ мм ошибка составляет максимальную величину ≈ 93 мкм.

Выполненные расчеты и оценки показывают, что основная ошибка определяется изменением геометрического положения образующей относительно оси вращения. Но именно за счет этого фактора было достигнуто уменьшение угла Fi до 53°. Расчеты показали также, что без изменения геометрического положения образующей, только за счет изменения типа уравнения (сегмент параболы с высокой точностью заменяем сегментом эллипса) нельзя добиться уменьшения угла Fi.

Таким образом, можно сделать вывод, что рассмотренные методы координатных преобразований оптических поверхностей могут применяться только для узкого набора специальных условий. Для широкого круга практически важных задач они, к сожалению, не обеспечивают необходимой точности.

При другом подходе [2] координатные преобразования (2), (3) также используются для перемещения внеосевого сегмента на ось вращения шпинделя. После перехода к полярным координатам

$$\begin{aligned} x_3 &= \rho_3 \cos(\varphi) \\ y_3 &= \rho_3 \sin(\varphi) \\ z_3 &= z_3 \end{aligned} \qquad (6)$$

и преобразований из уравнения (1) для A_1, A_2, A_3, $A_4 = 0$ получим следующее уравнение образующей

$$z_3 = d_1 + d_2\rho\cos(\varphi) \pm [d_3 + d_4\rho\cos(\varphi) + d_5\rho^2 + d_6\rho^2\cos^2(\varphi)]^{1/2}, \qquad (7)$$

где координата z зависит не только от полярного радиуса ρ но и от полярного угла φ. В общем случае поверхность, определяемая уравнением (6) уже не является поверхностью вращения. Для ее изготовления предлагается использовать станки алмазного точения с дополнительными степенями свободы, которые имеют возможность управления выдвижением резца в зависимости от угла φ. Система управления станком алмазного точения [2], имея доступ к информации о величине угла φ (от датчика угла поворота шпинделя) и используя решение уравнения (6), получает величину требуемого выдвижения резца $z_3 = z_3(\varphi, \rho)$. К сожалению, предложенный метод выходит за рамки возможностей станков типа МО-200, МО-500 и не может быть применен нами на практике.

В связи с этим был рассмотрен класс преобразований, при которых положение образующей не изменяется относительно оси вращения. Такие преобразования применялись нами при изготовлении асферических поверхностей – внеосевых, или имеющих небольшую (4 – 6 мкм) асферичность, на станках АМТ, предназначенных для изготовления сферических поверхностей. Асферизация осуществлялась путём изменения значения и координат центра сферы точения. В данной работе проанализирован частный пример замены внеосевого сегмента параболической поверхности, задаваемой уравнением (1), где радиус кривизны R = 800 мм; коническая постоянная K = -1; y_{min} = 40 мм, $y_{max.}$ = 100 мм, сегментом сферической поверхности

$$z + z_0 = \frac{x^2 + (y + y_0)^2}{R + \sqrt{R^2 - (K+1)(y + y_0)^2}}, \qquad (8)$$

где K = 0; z_0, y_0, R – варьируемые параметры, значения которых должны обеспечить минимальную ошибку аппроксимации образующей (1) асферической поверхности вращения.

Полученные параметры аппроксимации:

- R = 809.4233 ±0.05489; (9)
- y_0 = -0.01582 ±0.0002;
- z_0 = -0.52576 ±0.00479;
- k = 0;

Результаты расчета данных для станка МО-200:

- Поверхность вогнутая;
- $z_н = 1.0$; $z_н = 6.25$;
- $y_н = 40$; $y_к. = 100$;
- Rсф = 803.61682; α = 9.73102;
- Fi = 43.28649; Асф = 0.0043. (10)

Результаты оценки точности аппроксимации образующей представлены на рис.2.

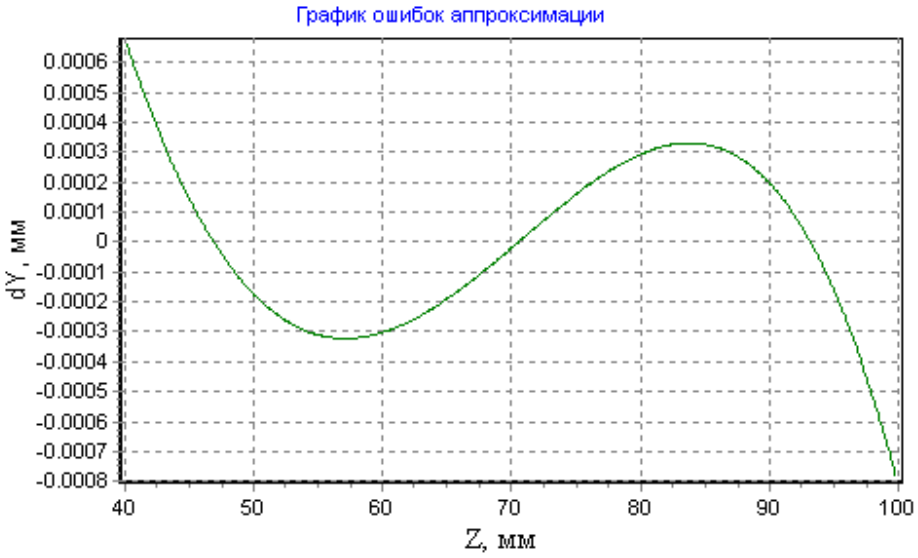

Рис. 2. График ошибок аппроксимации образующей с исходными данными (9).

Как видно из рисунка максимальный размах ошибки составляет 0.0015 мм. Сравнивая полученный результат с расчетом данных для станка МО-200, получим, что величина ошибки почти в 3 раза меньше расчетной величины асферизации Асф = 0.0043 мм (10). Следует отметить, что параметры z_0, y_0 трактуются нами, как составляющие линейного смещения системы координат относительно ее первоначального положения, при котором ось вращения совпадает с осью 0x системы координат. При перемещении системы координат ось вращения не перемещается, смещается только центр окружности. Тогда вторая составляющая ошибки будет равна 0. Суммарная ошибка определяется ошибками аппроксимации и составляет величину в пределах 0.0015 мм.

Литература

1. Cardona-Nunez O., Cornejo-Rodriguez A., Diaz-Uribe R., Cordero-Davila A., and Pedraza-Contreras J. Conic that best fits an off-axis conic section, Applied Optics. // vol. 25, No. 19, 1986, p. 3585 – 3588.
2. Mark Craig Gerchman. A Description Of Off-Axis Conic Surfaces For Non-Axisymmetric Surface Generation. // SPIE Vol. 1266 In-Process Optical Measurements and Industrial Methods, 1990, p. 262 - 267.
3. Справочник технолога оптика // под ред. М.А. Окатова. - 2-е изд. пер. и доп. - СПб. -Политехника-2004.-679 с.
4. Оптический производственный контроль // Под ред. Д. Малакары; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1985.- 400 с.